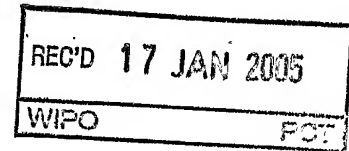


# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

PCT/EP2004/053557

20.12.2004



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 10 2004 004 814.2

**Anmeldetag:** 30. Januar 2004

**Anmelder/Inhaber:** Siemens Aktiengesellschaft, 80333 München/DE

**Bezeichnung:** Verfahren zur Kühlung elektrischer Spulen und  
Shimeisen

**IPC:** G 01 R 33/385

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 9. November 2004  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

**PRIORITY  
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Klostermeyst

Beschreibung

Verfahren zur Kühlung elektrischer Spulen und Shimeisen

5 Die vorliegende Erfindung bezieht sich allgemein auf die Kühlung elektrischer Spulen. Dabei bezieht sich die vorliegende Erfindung insbesondere auf ein neuartiges Kühlverfahren zur besseren Wärmeabfuhr an Gradientenspulen und Shim-Systemen von Kernspintomographiegeräten.

10

Generell besitzen elektrische Spulen eine Leistungs- bzw. Stabilitätsgrenze, die durch die begrenzte Abfuhr der ohmschen Verlustwärme definiert ist. Derartige Spulen werden beispielsweise in Form von Gradientenspulen und Shimspulen in  
15 der Magnetresonanztomographie (MRT) eingesetzt.

20

Gradientenspulen dienen der Ortskodierung im Inneren eines MRT-Gerätes, indem durch sie dem statischen homogenen Grundmagnetfeld ein dreidimensionales orthogonales Gradientenfeld in x-, y- und z-Richtung überlagert wird. x-Spule und y-Spule sind üblicherweise sogenannte Sattelspulen, die bezüglich der z-Achse um 90° gegeneinander gedreht sind. Die z-Spule stellt eine Maxwellspule dar.

25

Eine exakte Bildrekonstruktion in der MRT ist nur möglich, wenn während der Messung einerseits die Gradientenspulen eine ausreichende zeitliche Magnetfeldstabilität aufweisen und andererseits das statische Grundmagnetfeld ausreichend homogen ist.

30

Zur Homogenisierung des Grundfeldmagneten sind unter anderem zwei Techniken bekannt:

35

1. Innerhalb des orthogonalen Gradientensystems befindet sich ein weiteres stromdurchflossenes orthogonales Spulensystem, mit dem es möglich ist, das Grundmagnetfeld zu homogenisieren. Diese zusätzlichen Korrekturspulen (auch Shimspulen ge-

nannt) dienen dazu, Felddinhomogenitäten höherer Ordnung auszugleichen und sind sehr kompliziert aufgebaut, indem sie mit den Gradientenspulen verflochten sind.

- 5 2. Zur weiteren Homogenisierung des Grundmagnetfeldes wird mit Hilfe eines Feldberechnungsprogramms eine geeignete Anordnung von Magnetkörpern (Shimeisen) berechnet, die in die Gradientenspule integriert werden. Durch Größe und Position der Shimeisen kann der Verlauf der magnetischen Feldlinien  
10 des Grundfeldes und der Gradientenfelder beeinflusst werden. Als Vorgabe für die Berechnung dient eine Vorabmessung der Feldverteilung. Nach der Montage wird noch eine Kontrollmessung durchgeführt. Dieser Vorgang muss mehrfach wiederholt werden, bevor ein befriedigendes Shimergebnis erreicht ist.  
15 Die Shimeisen werden üblicherweise in Schubladen axial in sogenannte Shimkanäle in der Rohrwand des Gradientensystems eingeführt. Um Wirbelströme in den Shimeisen zu vermeiden bzw. zu minimieren, werden die jeweiligen Shimeisenblöcke aus Spielkarten-großen Shimblechen gestapelt.

20

Während die Technik unter Punkt 1 einen aktiven Shim darstellt, wird die Technik unter Punkt 2 als Passiv-Shim bezeichnet. Die Kombination beider Techniken stellt ein sogenanntes Shim-System dar.

5

- Aufgabe der Gradientenspulenstrom- und Shimspulenstrom-Versorgung ist es, Strompulse entsprechend der verwendeten Messsequenz amplituden- und zeitgenau zu erzeugen. Die erforderlichen Ströme liegen bei etwa 250 Ampere, die Stromanstiegsraten liegen in der Größenordnung von 250 kA/s.  
30

- Unter derartigen Bedingungen entsteht durch elektrische Verlustleistung in der Größenordnung von ca. 20 kW in den Gradientenspulen und in den Shimspulen sehr viel Wärme, die aktiv abgeführt werden muss, um zu vermeiden, dass das elektromagnetische Verhalten des Gradienten- und Shimsystems und damit die Bildgebung selbst beeinträchtigt wird.  
35

Auch eine Erwärmung der Shimeisen - einerseits durch ohmsche Verluste von nicht zu vermeidenden Wirbelströmen, andererseits durch Wärmeübertragung der Gradienten- und Shimspulenwärme (über das Vergussmaterial) - kann nicht vermieden werden und würde die Shimmung wesentlich beeinträchtigen, wenn nicht auch die Shimeisen gekühlt werden würden. Allerdings ist die Erwärmung der Shimeisen um Größenordnungen kleiner (in etwa 5 W) als die der Gradientenspulen und Shimspulen, weshalb eine aufwändige aktive Kühlung der einzelnen Shimeisen nicht unbedingt notwendig ist.

Die Kühlung herkömmlicher elektrischer Spulen aber auch die Kühlung von Gradientenspulen, Shimspulen und Shimeisen in der Kernspintomographie erfolgt nach dem Stand der Technik entweder durch Luft-Oberflächenkühlung (vorbeigeblasene Luft) oder durch Wasserkühlung. Die Ausführung einer aktiven Wasserkühlung stellt bisher die leistungsfähigste Kühlung dar. Allerdings wird die Wärme hierbei typischerweise vom zu kühlenden Leiter ins wärmeabführende fließende Wasser durch mehr oder weniger schlecht leitende Kunststoffschichten übertragen. Der dadurch hervorgerufene Wärmewiderstand begrenzt das maximale Leistungsvermögen der Wasserkühlung.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, ein Kühlsystem mit einem weitaus leistungsfähigerem Kühlvermögen zu schaffen, um mit geringem technischen Aufwand elektrische Spulen und Wärmequellen insbesondere in der Magnetresonanztomographie zu kühlen.

Diese Aufgabe wird gemäß der vorliegenden Erfindung durch die Merkmale der unabhängigen Ansprüche gelöst. Die abhängigen Ansprüche bilden den zentralen Gedanken der Erfindung in besonders vorteilhafter Weise weiter.

Erfindungsgemäß wird eine elektrische Spule mit Kühlsystem beansprucht, wobei das Kühlsystem eine Wärmeabfuhrereinrichtung

mit einem Fluid und einem temperierten Reservoir dieses Fluids umfasst, und wobei die Spule mittels des Fluids an das temperierte Reservoir gekoppelt ist, und das Reservoir dergestalt temperaturgeregelt ist, dass die Temperatur sowie der Druck des Fluids in unmittelbarer Nähe des kritischen Punkts des Fluids gehalten wird.

In einer ersten Ausführung der Erfindung erfolgt die Kopplung durch ein gut wärmeleitfähiges Rohr, welches das Fluid enthält und in thermischem Kontakt mit dem Spulenleiter steht, indem es die elektrische Spule durchzieht.

In einer zweiten Ausführungsform der Erfindung besteht die Koppelung durch den Leiter der elektrischen Spule selbst, indem dieser rohrförmig ausgebildet ist und das Fluid enthält.

In einer dritten Ausführungsform erfolgt die Koppelung durch ein wärmeisolierendes Rohr, in dessen Inneren der Spulenleiter koaxial geführt ist und welches gleichzeitig das Fluid enthält.

Vorteilhafterweise entspricht die kritische Temperatur des Fluids in etwa Raumtemperatur.

Insofern bietet sich als Fluid erfindungsgemäß Kohlendioxid oder  $C_2F_6$  an.

Um eine optimale Kühlung zu erzeugen, werden Temperatur und Druck des Fluids im Reservoir durch einen Wärmetauscher in unmittelbarer Nähe des kritischen Punktes gehalten.

In einer besonderen Ausführungsform der Erfindung stellt die elektrische Spule eine Gradientenspule für ein Kernspintomographiegerät dar, mit einer elektrischen Spule mit Kühlsystem gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Gradientenspule eine transversale Gradientenspule und/oder eine axiale Gradientenspule ist.

In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung stellt die elektrische Spule eine Shimspule für ein Kernspintomographie-  
gerät dar, mit einer elektrischen Spule und Kühlsystem gemäß  
5 einem der vorhergehenden Ansprüche.

Ferner wird erfindungsgemäß ein Kernspintomographiegerät be-  
ansprucht mit Shimeisen und Kühlsystem, wobei das Kühlsystem  
eine Wärmeabfuhrereinrichtung mit einem Fluid und einem tempe-  
10 rierten Reservoir dieses Fluids umfasst, und wobei die Shi-  
meisen mittels eines Fluids an das temperierte Reservoir ge-  
koppelt ist und das Reservoir dergestalt temperaturgeregelt  
ist, dass die Temperatur sowie der Druck des Fluids in unmit-  
telbarer Nähe des kritischen Punktes des Fluids gehalten  
15 wird.

In einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung werden  
die Shimeisenkanäle an ein das Fluid enthaltende Röhrensystem  
thermisch gekoppelt.  
20

Auch hier ist es von Vorteil, wenn die kritische Temperatur  
des Fluids in etwa Raumtemperatur entspricht.

Insofern ist es vorteilhaft, als Fluid Kohlendioxid oder  $C_2F_6$   
zu verwenden.  
25

Erfindungsgemäß wird die Temperatur und der Druck des Fluids  
im Reservoir durch einen Wärmetauscher in unmittelbarer Nähe  
des kritischen Punktes gehalten.  
30

Weitere Vorteile, Merkmale und Eigenschaften der vorliegenden  
Erfindung werden nun anhand von Ausführungsbeispielen bezug-  
nehmend auf die begleitenden Zeichnungen näher erläutert.

35 Fig. 1 zeigt perspektivisch das Gradienten-Shim-System eines  
MRT-Gerätes mit einer Koppelung zweier Shimkanäle an ein Flu-  
idreservoir.

Fig. 2 zeigt eine mögliche Koppelung einer elektrischen Spule durch den Leiter selbst.

- 5 Fig. 3 zeigt eine mögliche Koppelung einer elektrischen Spule durch einen koaxial geführten Leiter in einem Fluid-gefüllten Isolator.

- 10 Fig. 4 zeigt eine mögliche Koppelung einer elektrischen Spule durch einen Fluid-gefüllten thermischen Leiter, der an geeigneten Stellen in thermischem Kontakt mit dem elektrischen Leiter der Spule steht.

- 15 Fig. 5 zeigt die Anomalie des Wärmeleitkoeffizienten von  $\text{CO}_2$  in der Nähe des kritischen Punktes.

Wie bereits eingangs dargestellt, werden elektrische Spulen wie beispielsweise vergossene Gradientenspulen oder Shimspulen in MRT-Geräten derzeit luft- oder wassergekühlt, was aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Vergussmaterials zu einer deutlichen Begrenzung der Wärmeabfuhrleistung führt. Die vorliegende Erfindung stellt eine wesentliche Verbesserung derartiger Kühlsysteme dar. Es wird vorgeschlagen, zur Wärmeübertragung (beispielsweise in elektrischen Spulen) die nahezu unbegrenzt große Wärmeleitfähigkeit von Fluiden im Bereich ihres kritischen Punktes auszunutzen.

Die Anomalie des Wärmeleitkoeffizienten  $\lambda$  von Fluiden in der Nähe des kritischen Punktes ist seit langem bekannt und beispielsweise in dem Buch "The properties of gases & liquids, Reid, Prausnitz, Poling, McGraw-Hill Book Company, 4. Auflage, ISBN 0-07-051799-1" auf den Seiten 518 bis 520 kurz beschrieben.

- 35 In Fig. 5 ist die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) in Abhängigkeit von der Dichte bei unterschiedlichen Temperaturen graphisch dargestellt (Fig. 5 wurde aus der erwähnten

Literaturstelle übernommen). Gezeigt sind vier Verläufe von  $\lambda$  (gemessen in W/mK) im Bereich der kritischen Dichte ( $\rho_c=0,468$  g/cm<sup>3</sup>) bei Temperaturen von 75, 40, 34 und 32 °C. Die Graphik zeigt ein deutliches starkes Ansteigen von  $\lambda$  in einem relativ schmalen Bereich der kritischen Dichte ( $\pm 0,1$  g/cm<sup>3</sup>) je mehr sich die Temperatur der kritischen Temperatur ( $T_c=31^\circ\text{C}$ ) nähert. So beträgt das  $\lambda$  von CO<sub>2</sub> bei 32°C bereits das sechsfache (0,3 W/mK) des Wertes wie bei 75 °C (0.05 W/mK). Schließlich wird bei 31 °C theoretisch ein nahezu unendlicher Wert erwartet (in Fig. 5 nicht dargestellt).

Eine eindeutige Erklärung dieses Phänomens wird nicht gegeben. Es wird lediglich die Vermutung geäußert, dass mikroskopische molekulare Phasen- bzw. Ordnungsübergänge verantwortlich sein könnten bzw. mikroskopische Strömungseffekte aufgrund von Molekülcluster-Bewegungen.

Eine technische Anwendung dieses Effektes wird erstmalig in "German Jet Engine and Gas Turbine Development 1930-1945, Anthony L. Key, Airline, England" auf den Seiten 214/215 beschrieben. Prof. Ernst Schmidt begann 1938 im Rahmen von Untersuchungen zu Kühlverfahren bei Gasturbinenschaufeln mit Studien der Wärmeleitfähigkeit von Fluiden im Bereich des kritischen Punktes. Um die am kritischen Punkt theoretisch unendliche Wärmeleitfähigkeit zu demonstrieren, füllte er ein Stahlrohr zu einem Drittel mit verflüssigten Ammoniak (NH<sub>3</sub>). Bei praktisch allen Gasen entspricht die Dichte im flüssigen Zustand etwa der dreifachen Dichte des kritischen Zustands. Die genannte Ammoniak-Füllung zu einem Drittel führt damit bei der kritischen Temperatur gleichzeitig auch zum kritischen Druck. Nach einer Erwärmung auf 20 °C besaß das Rohr eine Wärmeleitfähigkeit wie die eines Rohres aus reinem Kupfer. Nach weiterer Temperaturerhöhung auf die kritische Temperatur ( $T_c=132^\circ\text{C}$ ) - so wird berichtet - übertraf die Wärmeleitfähigkeit des Rohres die von Kupfer nun mehr als das 20-fache.



Zur Kühlung von Gasturbinenschaufeln wurde der beschriebene Effekt auf Wasser übertragen, indem bei einem kritischen Druck von 76 Bar Wasserdampf mit kritischer Temperatur (374°C) durch Turbinenschaufeln gedrückt wurde.

5

Gemäß der vorliegenden Erfindung soll der beschriebene Effekt genutzt werden, elektrische Spulen wie sie beispielsweise in MRT-Geräten als Gradientenspulen und Shimspulen eingesetzt werden, auf Betriebstemperatur zu halten. Dazu wird erfindungsgemäß das zu kühlende Leiterstück thermisch über eine Wärmesenke - beispielsweise einem Kühlrohr - an ein Fluidreservoir gekoppelt. Das Fluidsystem ist mit einem Fluid bei annähernd kritischer Temperatur und kritischem Druck gefüllt. Dieser Druck und diese Temperatur wird über einen Wärmetauscher bzw. einen Druckregler aufrechterhalten bzw. geregelt.

15

Auf diese Weise steht der zu kühlende Abschnitt durch extrem gute Wärmeleitung in direktem Kontakt zu dem Fluidreservoir. Der Transport eines Trägermediums zur Wärmeabfuhr an der zu kühlenden Stelle (wie bisher bei aktiver Wasserkühlung) ist nicht mehr notwendig. Aus diesem Grund existieren im erfindungsgemäßen Fluidsystem keine Grenzschichteffekte (Prandtl'sche Grenzschicht), die den Wärmeübergangswiderstand deutlich erhöhen.

20

Auch die Viskosität des Fluids als statisches Medium ist bei dem erfindungsgemäßen Kühlsystem ohne Belang. Die Wärmekapazität des Fluids ist nur insofern wichtig, als dass sie die Schnelligkeit der Wärmeabfuhr des Reservoirs und damit die Regelträgheit des Fluidsystems betrifft. Im Gegensatz zu Heatpipes hat die Schwerkraft (Gravitation) keinen Einfluss; die Wärmeleitung erfolgt in dem Fluid in jeder Raumrichtung gleichermaßen.

30

Für den Betrieb bei Raumtemperatur (ca. 293 K, 20°C) bietet sich als Füllgas  $C_2F_6$  an, dessen kritischer Druck beherrscht

35

bare 30 Bar beträgt und dessen kritische Temperatur von 292 K (19°C) nur wenig unterhalb der Betriebstemperatur liegt.

Möglich wäre auch CO<sub>2</sub> mit einem kritischen Druck von 72 Bar und einer kritischen Temperatur von 301 K, minimal oberhalb der Betriebstemperatur. Letzteres hat den Vorteil, dass eine leichte Erwärmung die bereits große thermische Leitfähigkeit durch Annäherung an den kritischen Punkt noch weiter verbessert und damit die Temperatur des Leiters stabilisiert.

Erfindungsgemäß sind verschiedene Arten der thermischen Ankopplung des zu kühlenden Elements (Spulenleiter oder Shimeisen) möglich.

In einem ersten Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 2 ist der Spulenleiter als Rohr 1 ausgebildet, in dem sich das besagte Fluid 2 befindet.

In einem zweiten Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 3 ist der Leiter 3 von einem fluidgefüllten Hohlrohr 4 umgeben, dessen Rohrwand elektrisch isolierend und thermisch schlecht leitend ist, so dass die Wärme entlang des Rohrinne 4 geleitet wird, umgebende Trägerstrukturen aber nicht erwärmt werden. Der Leiter 3 kann z. B. wie bei einem Koaxialkabel mit Stützrippen 5 in dem Hohlrohr 4 gehalten werden.

In beiden Ausführungsbeispielen ist das Rohrinne 2 mit dem gekühlten Fluidreservoir 6 verbunden.

In einer dritten erfindungsgemäß Ausführung gemäß Fig. 4 ist die zu kühlende elektrische Spule 9 mit einem getrennten fluidgefüllten Rohr 7 durchzogen, welches an mehreren Stellen 8 thermischen Kontakt mit dem Spulenleiter 9 hat und zumindest an einem Ende mit dem gekühlten Fluidreservoir 6 verbunden ist.

Wie bereits in der Beschreibungseinleitung erwähnt, ist es in der Regel auch notwendig, die Shimeisen 10 zu kühlen, um die Homogenität des Grundmagnetfeldes zu gewährleisten bzw. aufrecht zu erhalten. Obwohl die Erwärmung der Shimeisen 10

5 weitaus geringer ist als die der Gradienten- oder Shimspulenleiter ist eine Wärmeabfuhr notwendig, wobei auch hier erfindungsgemäß der beschriebene Effekt ausgenutzt werden kann.

Die Shimeisen werden üblicherweise in schubladenähnlichen

10 Einschüben 11 angeordnet, wobei die Anzahl der Shimbleche 12 in den unterschiedlichen Shimeisen (auch Shimstapel genannt) durchaus verschieden sein kann. Fig. 1 zeigt beispielsweise einen Einschub 11 mit drei Shimeisen (Shimstapeln) 10, wobei der vordere Stapel fünf, der mittlere Stapel drei und der

15 hintere Stapel zwei Shimbleche 12 aufweist. In der Regel befindet sich in jeweils einem Shimkanal 13 ein Einschub 11 mit sechzehn bis achzehn Shimeisenstapel bei insgesamt sechzehn Shimkanälen 13, die im Gradientenspulenkörper 14 radial gleichmäßig verteilt sind und axial verlaufen. Die Einschübe

20 11 werden stirnseitig axial eingeschoben.

Eine Kühlung der Shimeisen 10 unter Verwendung des oben beschriebenen Effektes erfolgt erfindungsgemäß durch eine An-

5 kopplung sämtlicher Shimkanäle 13 (in welchen sich jeweils die schubladenähnlichen Einschübe 11 befinden) an ein temperiertes Fluidreservoir 6. Die Ankopplung erfolgt über (Thermo-) Schläuche 15, die stirnseitig an den entsprechenden Shimkanal 13 angeflanscht werden. In Fig. 1 sind zwei solche Schläuche 15 dargestellt. Jeder Shimkanal 13 ist mit dem

30 Fluid 2 gefüllt, welches über die Schläuche im Reservoir 6 bei kritischer Temperatur temperiert wird. Auf diese Weise wird die Wärme der Shimeisen 10 unmittelbar über das Fluidreservoir 6 abgeführt.

35 Eine weniger aufwändige Kühlung der Shimeisen 10 besteht darin, die Schläuche 15 mit einer passiven Wärmesenke beispielsweise mit der Außenhülle des Grundfeldmagneten zu kop-

pehn und auf ein zu temperierendes Fluidreservoir 6 zu verzichten. Eine solche Ausbildung der Shimeisenkühlung ist allerdings nur dann effizient, wenn eine gewisse Wärmeleistung der Shimeisen 10 nicht überschritten wird.

## Patentansprüche

1. Elektrische Spule mit Kühlsystem,  
wobei das Kühlsystem eine Wärmeabfuhrereinrichtung mit einem  
5 Fluid (2) und einem temperierten Reservoir (6) dieses Fluids  
(2) umfasst,  
und wobei die Spule (1)(3)(9) mittels des Fluids (2) an das  
temperierte Reservoir (6) gekoppelt ist und das Reservoir (6)  
dergestalt temperaturgeregelt ist, dass die Temperatur sowie  
10 der Druck des Fluids (2) in unmittelbarer Nähe des kritischen  
Punktes des Fluids (2) gehalten wird.

2. Elektrische Spule nach Anspruch 1,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,  
15 dass die Koppelung durch ein gut wärmeleitfähiges Rohr (7)  
ausgebildet ist welches das Fluid (2) enthält und in thermi-  
schem Kontakt (8) mit dem Spulenleiter (9) steht indem es die  
elektrische Spule durchzieht.

20 3. Elektrische Spule nach Anspruch 1,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,  
dass die Koppelung den Leiter (1) der elektrischen Spule  
selbst umfasst indem dieser (1) rohrförmig ausgebildet ist  
und das Fluid (2) enthält.

4. Elektrische Spule nach Anspruch 1,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,  
dass die Koppelung ein wärmeisolierendes Rohr (4) umfasst in  
dessen Inneren (2) der Spulenleiter (3) coaxial geführt ist  
30 und welches gleichzeitig das Fluid (2) enthält.

5. Elektrische Spule nach einem der Ansprüche 1 bis 4,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,  
dass die kritische Temperatur des Fluids (2) in etwa Raumtem-  
35 peratur entspricht.

6. Elektrische Spule nach einem der Ansprüche 1 bis 5,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,  
dass das Fluid (2) Kohlendioxid oder  $C_2F_6$  ist.

7. Elektrische Spule nach einem der Ansprüche 1 bis 6,

5 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,  
dass Temperatur und Druck des Fluids (2) im Reservoir (6)  
durch einen Wärmetauscher in unmittelbarer Nähe des kriti-  
schen Punktes gehalten wird.

10 8. Gradientenspule für ein Kernspintomographiegerät  
mit einer elektrischen Spule mit Kühlsystem gemäß einem der  
Ansprüche 1 bis 7.

9. Gradientenspule nach Anspruch 8,  
15 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,  
dass die Spule eine transversale Gradientenspule ist.

10. Gradientenspule nach Anspruch 8,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,  
20 dass die Spule eine axiale Gradientenspule ist.

11. Shimspule für ein Kernspintomographiegerät  
mit einer elektrischen Spule mit Kühlsystem gemäß einem der  
Ansprüche 1 bis 7.

12. Kernspintomographiegerät mit Shimeisen und Kühlsystem,  
wobei das Kühlsystem eine Wärmeabfuhrereinrichtung mit einem  
Fluid (2) und einem temperierten Reservoir (6) dieses Fluids  
(2) umfasst,  
30 und wobei die Shimeisen mittels des Fluids (2) an das tempe-  
rierte Reservoir (6) gekoppelt ist und das Reservoir (6) der-  
gestalt temperaturgeregelt ist, dass die Temperatur sowie der  
Druck des Fluids (2) in unmittelbarer Nähe des kritischen  
Punktes des Fluids (2) gehalten wird.

35 13. Kernspintomographiegerät nach Anspruch 12  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,

dass die Shimkanäle (13) an ein das Fluid (2) enthaltene Röhrensystem (15) thermisch gekoppelt sind.

14. Kernspintomographiegerät nach einem der Ansprüche 12 bis  
5 13,

dadurch gekennzeichnet,  
dass die kritische Temperatur des Fluids (2) in etwa Raumtemperatur entspricht.

10 15. Kernspintomographiegerät nach einem der Ansprüche 12 bis 14,

dadurch gekennzeichnet,  
dass das Fluid (2) Kohlendioxid oder  $C_2F_6$  ist.

15 16. Kernspintomographiegerät nach einem der Ansprüche 12 bis 15,

dadurch gekennzeichnet,  
dass Temperatur und Druck des Fluids (2) im Reservoir (6) durch einen Wärmetauscher in unmittelbarer Nähe des kritischen Punktes gehalten wird.  
20

Zusammenfassung

Verfahren zur Kühlung elektrischer Spulen und Shimeisen

- 5 Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf die Kühlung elektrischer Spulen, insbesondere auf ein neuartiges Kühlverfahren zur besseren Wärmeabfuhr in MRT-Geräten.

- Beansprucht wird eine elektrische Spule mit Kühlsystem,  
10 wobei das Kühlsystem eine Wärmeabfuereinrichtung mit einem Fluid (2) und einem temperierten Reservoir (6) dieses Fluids (2) umfasst, und wobei die Spule mittels des Fluids (2) an das temperierte Reservoir (6) gekoppelt ist und das Reservoir (6) dergestalt temperaturgeregelt ist, dass die Temperatur  
15 sowie der Druck des Fluids (2) in unmittelbarer Nähe des kritischen Punktes des Fluids (2) gehalten wird.

Fig. 1

20



FIG 1

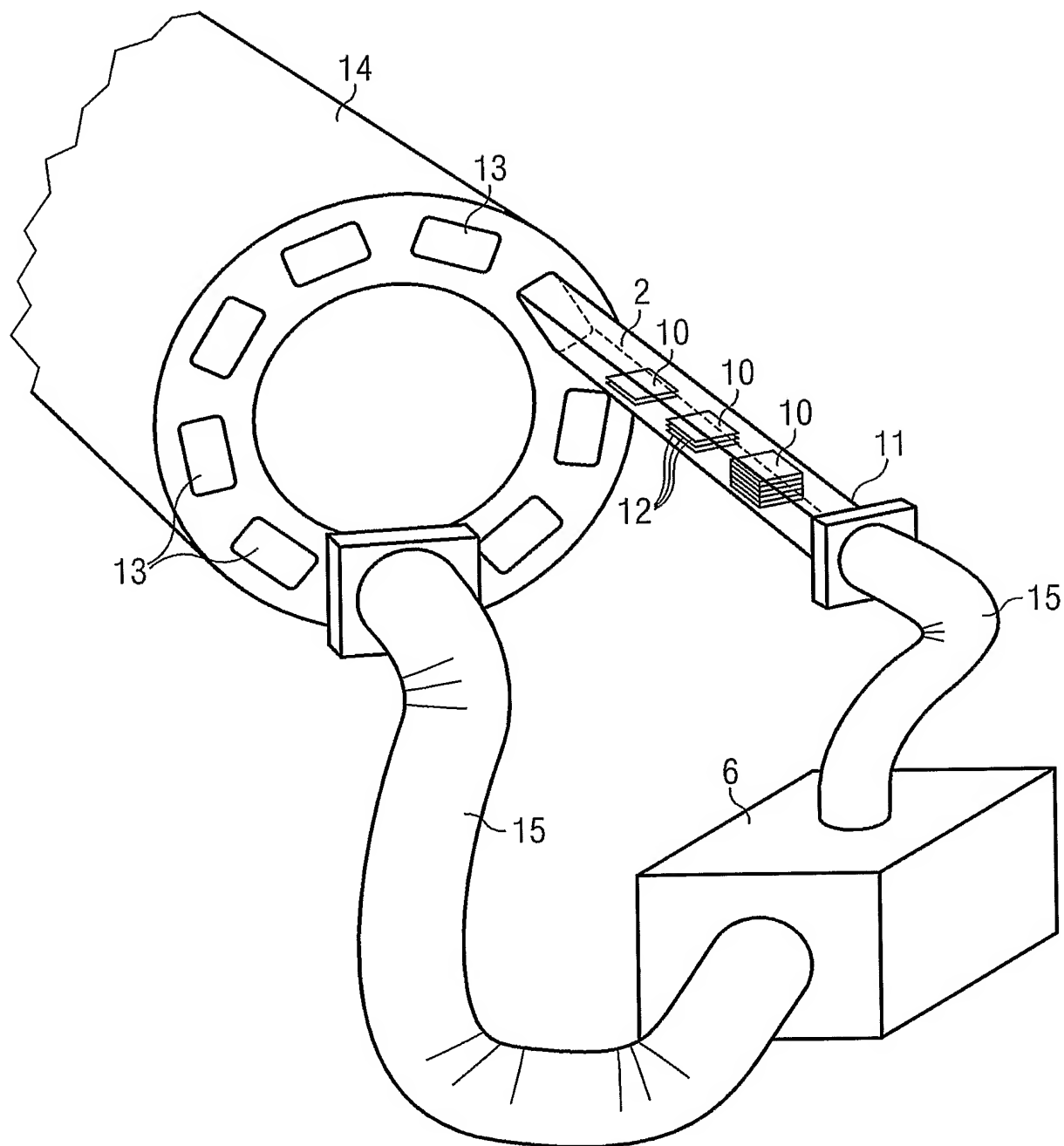


FIG 2

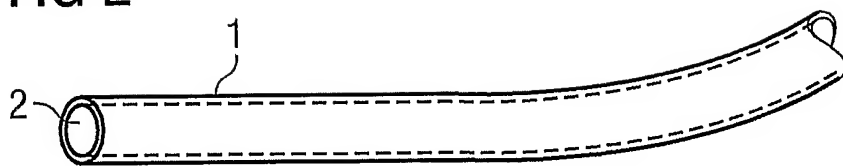


FIG 3

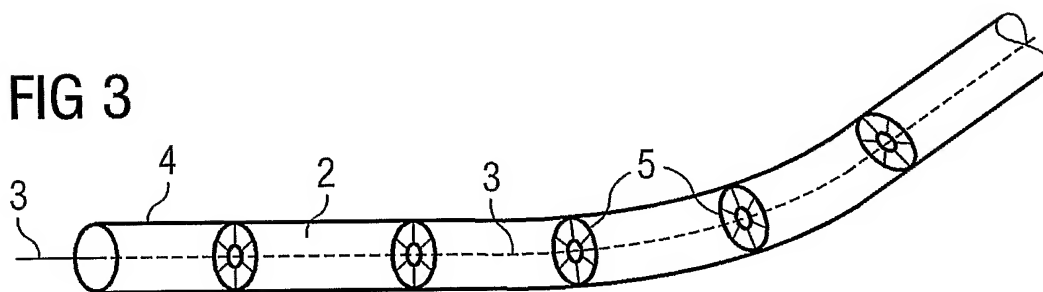


FIG 4

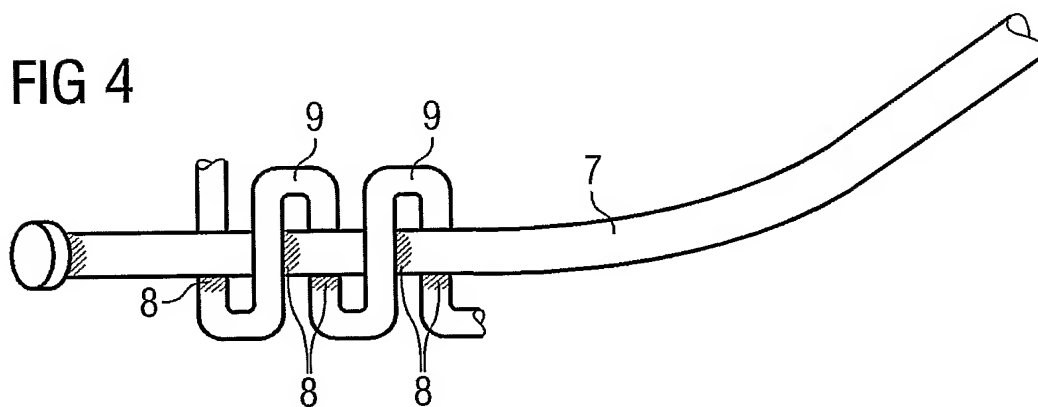


FIG 5

